

М. В. Майсурадзе, М. А. Рыжков,
Ю. В. Юдин, О. А. Дюсимбаев
УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург
20983@rambler.ru

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАКАЛОЧНЫХ СРЕД

Рассмотрена методика определения коэффициента теплоотдачи закалочных сред из анализа траектории охлаждения цилиндрического термозонда. Показано, что учет критерия Био при анализе экспериментальных данных позволяет получить хорошее соответствие с результатами численного решения обратной задачи теплопроводности.

Ключевые слова: коэффициент теплоотдачи; охлаждающие среды; термозонд; обратная задача теплопроводности; критерий Био.

The method of determining the heat transfer coefficient of cooling media from the thermoprobe cooling curve analysis is described. The use of Biot number for analysis of the experimental data provides good agreement with the results of the numerical solution of inverse heat transfer problem.

Key words: heat transfer coefficient; cooling media; thermoprobe; inverse heat transfer problem; Biot number.

При термической обработке стали правильный выбор закалочных сред оказывает решающее влияние на качество изделий. В настоящей работе рассматривается возможность применения специально сконструированного термозонда для определения охлаждающей способности сред, традиционно применяемых для термической обработки (вода, масло, воздух).

Термозонд (рис. 1) представляет собой цилиндр из стали 12Х18Н10Т, в центре которого находится регистрирующая термопара типа ХА диаметром 1,5 мм. Температура нагрева термозонда составляла 840–860 °С, время выдержки – не менее 15–20 мин.

Охлаждение термозонда производили в перемешиваемой воде комнатной температуры, закалочном масле и на спокойном воздухе. В результате экспериментов были получены траектории охлаждения термозонда, которые использовались для расчета коэффициента теплоотдачи по формуле [1]:

$$\alpha = (c \cdot \rho \cdot \delta \cdot v) / (t - t_c), \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К), c – удельная теплоемкость охлаждаемого металла, Дж/(кг·К), ρ – плотность стали, кг/м³, δ – расстояние от поверхности до горячего спая термопары, м, v – скорость охладж

ния в данный момент времени, $^{\circ}\text{C}/\text{с}$, t – температура металла в данный момент времени, $^{\circ}\text{C}$, t_c – температура охлаждающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

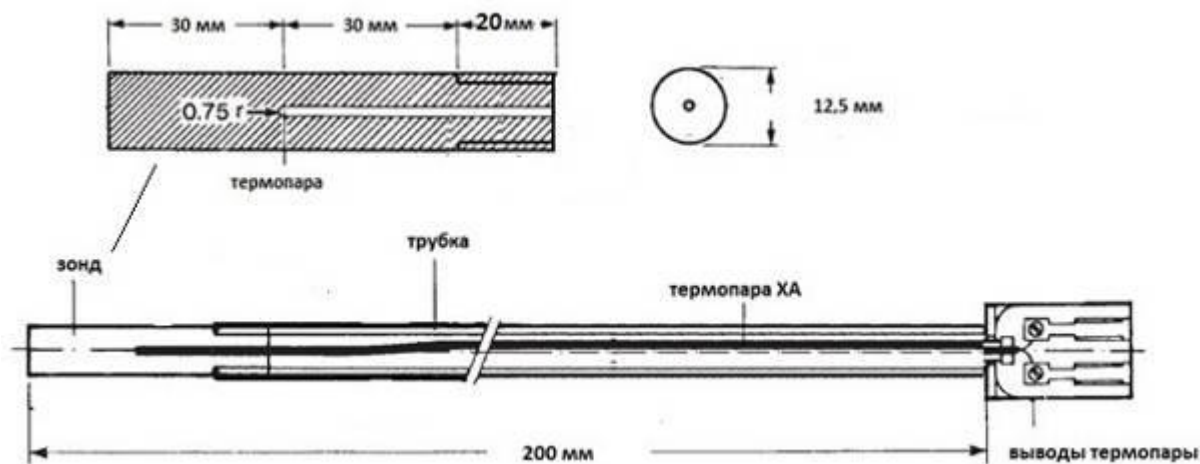


Рис. 1. Эскиз термозонда

Также для определения коэффициента теплоотдачи охлаждающих сред была решена обратная задача теплопроводности путем численного моделирования процесса охлаждения термозонда по методике [2]. Установлено, что рассчитанные по формуле (1) значения коэффициента теплоотдачи в случае охлаждения в воде и масле оказались ниже, чем определенные в ходе численного моделирования (рис. 2, а, б). При охлаждении на спокойном воздухе значения коэффициента теплоотдачи, полученные двумя разными методами, практически полностью совпали (рис. 2, в).

Это связано с тем, что при высокой интенсивности охлаждения используемый термозонд является теплотехнически массивным телом, т. е. возникает существенный перепад температур между его поверхностью и осью, на которой производится измерение температуры.

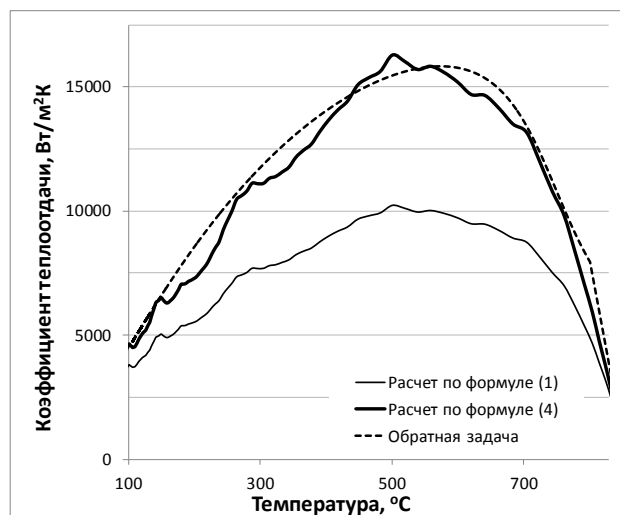
Для оценки массивности изделия при нагреве и охлаждении используется критерий Био, Bi , и коэффициент массивности, m [3]. Расчет данных величин ведется по формулам:

$$Bi = \alpha \cdot \delta / \lambda, \quad (2)$$

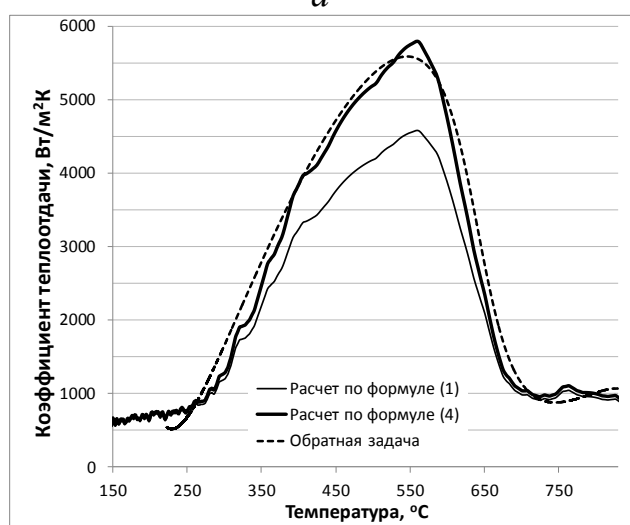
где α – коэффициент теплоотдачи, определенный по формуле (1) для каждого момента времени, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$; δ – характеристический размер тела (в данном случае – радиус термозонда); λ – коэффициент теплопроводности материала термозонда, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$.

$$m = 1 + Bi / (k + 2), \quad (3)$$

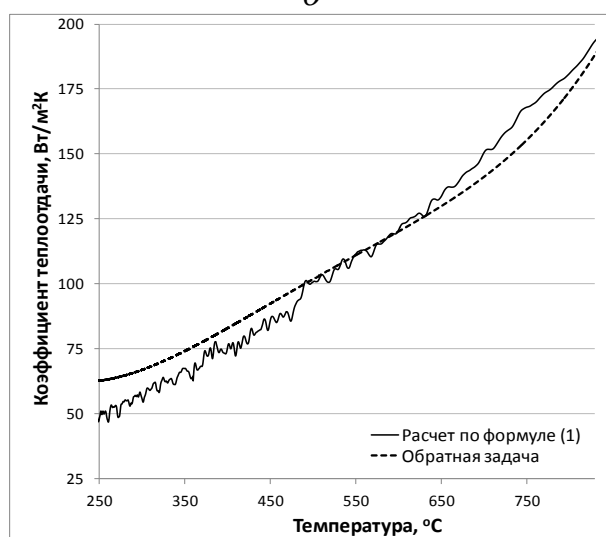
где $k = 2$ для цилиндрического термозонда.



a



б



в

Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности термозонда: *a* – охлаждение в перемешиваемой воде; *б* – охлаждение в спокойном масле; *в* – охлаждение на спокойном воздухе

В результате, введя в формулу (1), коэффициент массивности m , получим:

$$\alpha' = (c \cdot \rho \cdot \delta \cdot v \cdot m) / (t - t_c). \quad (4)$$

Установлено, что зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры, определенная по формуле (4), удовлетворительно совпадает с результатами численного моделирования (рис. 2, *а*, *б*).

Таким образом, имеется возможность использовать предлагаемую методику для быстрой оценки охлаждающей способности закалочных сред в производственных условиях, не прибегая к численному моделированию процесса охлаждения для решения обратной задачи теплопроводности.

Список литературы

1. Будрин Д. В. Водовоздушное охлаждение при закалке / Д. В. Будрин, В. М. Кондратов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1965. № 6. С. 22–25.
2. Майсурадзе М. В. Методика численного моделирования процесса охлаждения при термической обработке стальных изделий простой формы / М. В. Майсурадзе, Ю. В. Юдин, М. А. Рыжков // Сталь. 2013. № 10. С. 90–94.
3. Эйсмонтт Ю. Г. Термическое оборудование и его расчет : учеб. пособие : в 4 кн. Кн. 2. Охлаждающее и вспомогательное термическое оборудование / Ю. Г. Эйсмонтт. Челябинск: ЮУрГУ, 1997. 159 с.